Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Numerical Study of Forced Convection in a Microchannel in Presence of Nanofluid using the Slip Condition

Research Article

Afshin Ahmadi Nadooshan[1], Dariush Bahrami[2], Morteza Bayareh[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.77928.1133

1. Introduction

Microchannels are among the newest devices that have been recently used for cooling. The thermal and fluid flow behavior of microchannels was first investigated by Tuckerman and Pease. Some researchers have examined numerically the heat transfer in a microchannel under constant flow with water-based nanofluid and evaluated the effect of slip and no-slip boundary conditions on the flow in the microchannel. Their results showed that the nanofluid enhances heat transfer and the electric field has a significant impact on heat transfer.

In this study, the fluid flow inside the microchannel is modeled by assuming laminar, incompressible, and two-dimensional flow. The slip condition is applied on the walls and the outlet flow of the channel is considered as developed flow. The application of asymmetric boundary condition is the innovation of this work. Examining the impacts of slip condition on the hydrodynamic and thermal behavior of nanofluid is another innovation of the present work.

2. Description of the problem

Figure 1 illustrates the schematic of the problem for a channel with an aspect ratio of *l*/*H* = 30, where *l* and *H* are the length and height of the channel, respectively. The slip boundary condition is considered for all the walls and the analysis of the channel is done regarding two dimensions.

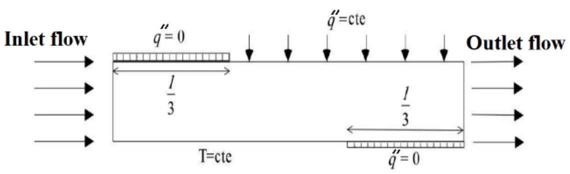


Figure 1. Schematic of the problem

3. Governing equations

Continuity and Navier-Stokes equations are expressed in Cartesian coordinates as follows:

Continuity equation:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (1)$$

Momentum equation in the x-direction:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad (2)$$

Momentum equation in the y-direction:

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial v} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \qquad (3)$$

Energy equation:

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (4)$$

The average Nusselt number along the channel is shown as follows:

$$Nu_x \;_{y=0;h} = \frac{q''h}{(T_{(x)} - T)k_{nf}} \qquad (5)$$

4. Grid study and validation

The average dimensionless temperature at the outlet of the microchannel at a Reynolds number of 100 and a slip coefficient of 0.04 for pure water show that the grid with the 60×450 nodes can be selected as the optimal solution grid. The values of the local Nusselt number obtained from the present work and the values reported by Raisi et al. indicate the maximum error between the two works is 7.6%; therefore, the validity of the present results is acceptable.

5. Results

Figure 2 reveals that when the slip coefficient increases, the maximum velocity in the middle of the channel reduces

Manuscript received: July 28, 2022, Revised, October 1, 2022, Accepted, November 6, 2022.

[1]. Corresponding author. Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University **Email**: ahmadi@sku.ac.ir
[2]. MA, Faculty of Engineering, Shahrekord University.
3. Associate Professor, Faculty of Engineering, Shahrekord University.

and the velocity at the side of the walls is not zero. This velocity for the slip coefficient between zero and 0.04 is higher than that for the slip coefficient between 0.04 and 0.08.

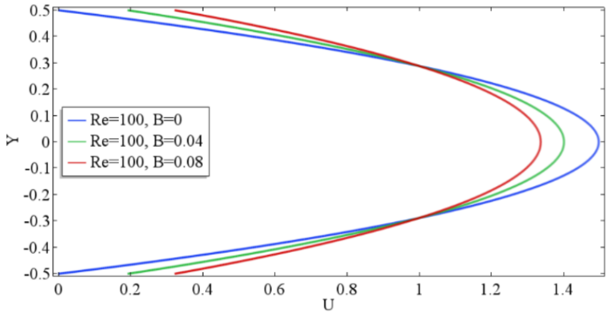


Figure 2. Velocity profile for different slip coefficients

Figure 3 depicts the value of Nusselt number for different values of volume percentage at a constant Reynolds number. One can see that as the volume fraction of the nanofluid is enhanced, the amount of heat transfer increases. Moreover, the Nusselt number is zero on the side of the insulated wall.

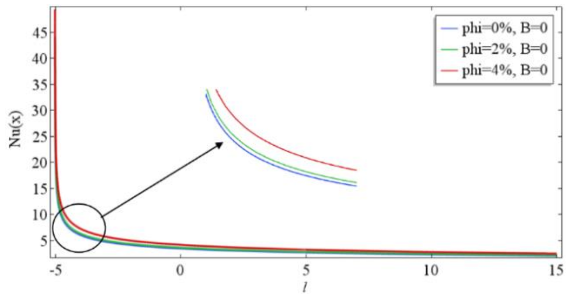


Figure 3. Local Nusselt number for different values of volume fraction

6. Conclusion

This study investigated the nanofluid flow in a microchannel. The results demonstrated that the velocity for the slip coefficient between zero and 0.04 is higher than that for the slip coefficient between 0.04 and 0.08. At a Reynolds number of 10, the temperature of the fluid increases rapidly due to its low velocity and the slip coefficient does not have a large impact on the velocity profile. While, at high values of Reynolds number, the temperature profile has a greater impact on the slip coefficient.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بررسی عددی جابه‌جایی اجباری در یک میکروکانال با وجود شرط لغزش و در حضور نانوسیال*

مقاله پژوهشی

افشین احمدی ندوشن(۱) داریوش بهرامی(۲) مرتضی بیاره(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2022.77928.1133

چکیده *تجهیزات در حد میکرو دارای مزایای بسیار زیادی از جمله بازده گرمایی بالا، نسبت سطح انتقال گرما به حجم زیاد، اندازه کوچک، وزن کم، سیال موردنیاز کم و انعطاف‌پذیری بالای طراحی هستند. در پژوهش حاضر، جریان سیال درون میکروکانال با فرض جریان آرام، تراکم‌ناپذیر و دو بعدی مدل شده است. شرط لغزش روی دیوارها اعمال شده و خروجی کانال به‌صورت توسعه یافته در نظر گرفته شده است. تأثیر پارامترهای مختلفی همچون ضریب لغزش بی‌بعد، عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار سرعت در ضریب لغزش بین صفر و ۰/۰٤ از مقدار سرعت در ضریب لغزش بین ۰/۰٤ و ۰/۰۸ بیشتر است. همچنین، هرچه عدد رینولدز بیشتر می‌شود محلی که قرار است توسعه‌یافتگی حرارتی صورت گیرد به سمت مرکز کانال و به طرف خروجی کانال حرکت می‌کند. در عدد رینولدز ۱۰ دمای سیال به علت سرعت کم آن سریعاً افزایش می‌یابد و ضریب لغزش تأثیر زیادی بر پروفیل سرعت ندارد. در حالی که در مقادیر بالای عدد رینولدز، پروفیل دما برای ضرایب سرعت لغزشی تأثیری بیشتری دارد. طبق نتایج به‌دست آمده با افزایش درصد کسر حجمی نانوسیال مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی میکروکانال، ضریب لغزش، نانوسیال، توسعه‌یافتگی حرارتی.

Numerical Study of Forced Convection in a Microchannel in Presence of Nanofluid using the Slip Condition

Afshin Ahmadi Nadooshan Dariush Bahrami Morteza Bayareh

Abstract Micro-scale equipment has many advantages such as high thermal efficiency, high heat transfer surface-to-volume ratio, small size, lightweight, low required fluid, and high design flexibility. In the current study, the fluid flow inside the microchannel is modeled by assuming laminar, incompressible, and two-dimensional flow. The slip boundary condition is applied on the walls and the outlet of the channel is considered as fully developed. The effect of various parameters such as dimensionless slip coefficient, Reynolds number, and volume fraction of nanofluid is examined. The obtained results demonstrate that the velocity for the slip coefficient between 0 and 0.04 is higher than that for the slip coefficient between 0.04 and 0.08. Also, as the Reynolds number increases, the place where thermal development is supposed to occur moves towards the center of the channel and towards the outlet of the channel. At a Reynolds number of 10, the temperature of the fluid is enhanced rapidly due to its low velocity, and the slip coefficient does not have a large effect on the velocity profile. At high Reynolds numbers, the temperature profile has a greater effect on the slip velocity coefficient. According to the results, the amount of heat transfer is increased with the volume fraction of the nanofluid.

Key Words Microchannel, Slip Coefficient, Nanofluid, Thermal Development.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۵/٦و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۸/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار ، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

Email:ahmadi@sku.ac.ir

(۲) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

(۳) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

مقدمه

یکی از جدیدترین وسایل خنک‌کاری که در سالیان اخیر برای خنک‌کاری قطعات الکترونیکی و صنایع مختلف مانند هوافضا و... وجود دارد، میکروکانال‌ها هستند. عملکرد حرارتی یکی از عوامل مهم در طراحی میکروکانال‌ها است. رفتار حرارتی و سیالاتی میکروکانال‌ها اولین بار توسط توکرمن و پیس [1] بررسی شد. بعدها نتایج عددی و تجربی فراوانی درباره این موضوع صورت گرفت. محققان برای افزایش بیشتر انتقال حرارت به روش‌های متفاوتی دست یافته‌اند که یکی از مهم-ترین روش‌ها استفاده از نانوسیال است. کریمی‌پور و همکاران در پژوهشی به بررسی عددی انتقال حرارت در میکروکانال تحت شار ثابت همراه با نانوسیال با سیال پایه آب پرداختند و تأثیر لغزش و عدم لغزش را در میکروکانال بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که این نوع نانوسیال باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود و میدان الکتریکی تأثیر به‌سزایی در انتقال حرارت دارد [2]. جلالی و کریمی‌پور یک میکروکانال که در آن تزریق وجود دارد را همراه با نانوسیال آلومینا با پایه آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد انتقال حرارت در اعداد رینولدز بالا تأثیر بیشتری دارد و افزایش کسر حجمی نانوسیال باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود [3]. محبی و همکاران انتقال حرارت را در یک کانال با سطوح گسترش‌یافته همراه با نانوسیال‌های مختلف با استفاده از روش بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوسیال از ۰ تا ۵ ٪ افزایش می‌یابد [4]. نیک‌خواه و همکاران یک میکروکانال را با شار متناوب روی دیواره کانال با شرط مرزی لغزش روی دیواره مورد بررسی قرار داده و نشان دادند سرعت روی دیواره کانال‌ها با افزایش ضریب لغزش افزایش می‌یابد و در اعداد رینولدز پایین، ضریب لغزش تأثیر زیادی در عدد ناسلت متوسط ندارد [5]. کمالی و بینش انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری آب و اکسید مس را در یک میکروکانال شار ثابت بررسی کردند و نشان دادند ضریب انتقال حرارت و عدد ناست افزایش می‌یابد [6].

رییسی و همکاران با بررسی یک میکروکانال دما ثابت نشان دادند ضرایب لغزشی تأثیر زیادی بر انتقال حرارت در اعداد رینولدز پایین ندارد ولی در در اعداد رینولدز بالا با افزایش ضریب لغزش انتقال حرارت افزایش زیادی دارد [7]. نظری و همکاران به‌صورت تجربی انتقال حرارت در یک لوله دما ثابت که داخل آن متخلخل بود را بررسی کردند و گزارش کردند انتقال حرارت با نانوسیال بیشتر آب خالص است [8]. طغرایی و همکاران جریان و انتقال گرما در یک میکروکانال صاف، سینوسی و زیگزاگ‌شکل را با نانوسیال و بدون نانوسیال بررسی کردند. اثرات دامنه و طول موج میکروکانال زیگزاگ‌شکل و سینوسی، کسر حجمی و عدد رینولدز بر انتقال گرما و معیار ارزیابی عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات اکسید مس، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین، دریافت شد که اگر تنها افزایش انتقال گرما در نظر گرفته شود، استفاده از میکروکانال‌های سینوسی بدون نانوذرات روش مؤثرتری نسبت به استفاده از نانوذرات در میکروکانال‌های صاف است [9].

کریمی‌پور و همکاران تأثیر تورفتگی بر روی پارامترهای جریان سیال و گرما نانوسیال نقره–آب در یک میکروکانال دو بعدی مستطیلی را بررسی کردند. این امر شامل انتقال گرما نانوسیال آب–نقره در یک میکروکانال دندانه‌دار تحت دمای ثابت بود. محاسبات برای دو محدوده عدد رینولدز انجام شد. در مواردی که دندانه‌ها عمق بیشتری داشتند، افت دمای بیشتری مشاهده شد که مربوط به قسمت مقطع خروجی میکروکانال بود. با افزایش عدد رینولدز، تعداد دندانه‌ها و کسر حجمی نانوذرات، افت دما بیشتر گزارش شد. حضور دندانه در میکروکانال سرعت و دمای بدون بعد در خط مرکزی را افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان دادند که نرخ انتقال گرما به طورقابل توجهی توسط کسر حجمی جامد و عدد رینولدز تحت تأثیر قرار می‌گیرد [10].

عربپور و همکاران با بررسی یک میکروکانال با شرایط مرزی لغزشی همراه با یک چاه حرارتی دریافتند که مقادیر مختلف عدد رینولدز، به همراه اعمال شار نوسانی گرما به میزان قابل‌توجهی بر عدد ناسلت تأثیر دارد و این اثربخشی در مقادیر عدد رینولدز بین ۱۰ و ۱۰۰ بیشتر قابل مشاهده است. همچنین، با افزایش ضریب لغزش در سطح لغزش، میزان کمینه حرارت به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که این رفتار باعث افزایش انتقال گرما می‌شود [11].

کدوسی و همکاران به بررسی اثر شار ثابت و دمای ثابت در حالات مختلف بر روی یک کانال سه‌بعدی پرداختند. آنها

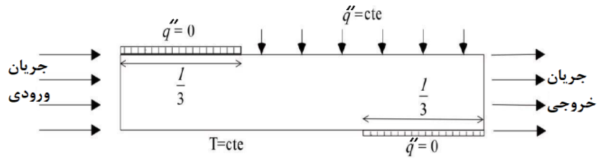
دریافتند اگر یکی از دیواره‌ها در راستای طول دارای شار ثابت و سه دیواره دیگر آدیاباتیک باشند با افزایش نسبت منظری در یک عدد نادسن ثابت، عدد ناسلت کاهش و در حالتی که دیواره در راستای عرض کانال دارای شار ثابت و سه دیواره دیگر آدیاباتیک باشند، در یک عدد نادسن ثابت با افزایش نسبت منظری عدد ناسلت افزایش می‌یابد [12]. الفریجات و همکاران با مطالعه یک دسته کانال شش ضلعی با چهارسیال Al_2o_3، CuO, SiO_2و آب خالص دریافتند که با افزایش عدد رینولدز انتروپی کل ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هرچه شار اعمالی روی دیواره‌ها افزایش یابد، انتروپی در اعداد رینولدز بزرگتری به مینیمم مقدار خود می‌رسد. از بین سیالات در این پژوهش آب کمترین تغییرات انتروپی با عدد رینولدز را دارا بود [13]. اسماعیلی‌نژاد و همکاران به بررسی یک کانال سه‌بعدی با شار ثابت روی دیواره پرداختند. آنها دریافتند با افزایش عدد رینولدز افت فشار سیال افزایش می‌یابد و در یک عدد رینولدز ثابت، افزایش کسر حجمی نانوسیال باعث افزایش افت فشار می‌شود [14] . انتقال حرارت جابه‌جایی در حضور نانوسیال در درون محفظه‌ها نیز مورد بررسی محققان زیادی قرار گرفته است. از جمله این تحقیقات، می‌توان به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در یک محفظه پر شده از میکروسیال با وجود استوانه‌ی دایره‌ای چرخان در مرکز محفظه [15] و انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در یک محفظه پر شده از میکروسیال با وجود پره چرخان [16] اشاره نمود. همچنین، شبیه‌سازی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات در میکروکانال چاه‌های گرمایی نیز مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. به عنوان مثال، آجیب و همکاران [17] با استفاده از سیال پایه آب و نانولوله-های کربنی چندجداره، انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال غیرنیوتنی در میکروکانال را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که در عدد رینولدز ۱۰۰۰، افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره به سیال پایه می‌تواند میزان انتقال حرارت را تا ۳۳ درصد افزایش دهد.

اخیرا، وانگ و چن [18] از نانوسیال آلومینا–آب برای بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در یک میکروکانل چاه گرمایی استفاده نمودند. آنها دریافتند که اگر کسر حجمی نانوسیال برابر با ۵ درصد باشد، مقدار مقاومت گرمایی نانوسیال تا ۱۴/۷ درصد نسبت به سیال پایه آب کاهش می‌یابد.

در کار حاضر، جریان سیال درون میکروکانال با فرض جریان آرام، تراکم‌ناپذیر و دو بعدی مدل شده است. شرط لغزش روی دیوارها اعمال شده و خروجی کانال به‌صورت توسعه یافته در نظر گرفته شده است. از آنجا که نسبت سطح به حجم در دستگاه‌های جریان محصور کوچک است، طول مشخصه کوچک مرتبط با دستگاه‌های میکرو اهمیت شرایط مرزی را نشان می‌دهد. محققان پیشنهاد کرده‌اند که شرط مرزی عدم لغزش پذیرفته شده برای هندسه‌های در مقیاس ماکرو ممکن است برای جریان در مقیاس میکرو و نانو مناسب نباشد. شرایط مرزی نامتقارن که دارای کاربرد عملی در طراحی میکروکانال چاه گرمایی است از نوآوری‌های این پژوهش به شمار می‌رود. همچنین، بررسی اثر شرط لغزش بر رفتار هیدرودینامیکی و گرمایی نانوسیال تأثیر نوآوری دیگر کار حاضر است. در تحقیق حاضر، تأثیر پارامترهای مختلفی همچون ضریب لغزش بی‌بعد، عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است.

شرح مساله

شکل (۱) شماتیک مسئله را برای یک کانال با نسبت ابعادی $\frac{l}{H}=$ ۳۰ نشان می‌دهد که l و H به ترتیب طول و ارتفاع کانال هستند. شرط مرزی لغزش برای تمامی دیواره‌ها در نظر گرفته می‌شود و تحلیل کانال به‌صورت دو بعدی صورت گرفته است. دیواره پایینی و فوقانی کانال به سه قسمت مساوی تقسیم شده است. ۱/۳ از دیواره بالایی عایق و ۲/۳ دیگر آن تحت شارحرارتی ثابت q'' است. همچنین، ۱/۳ دیواره پایینی عایق و ۲/۳ دیگر آن دارای دمای ثابت ۳۰۳ K است. جریان در میکروکانال آرام و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ شماتیک مسأله

خواص آب و نانو ذرات در جدول (۱) تعریف شده‌اند [19]:

جدول ۱ خواص آب و نانو ذرات

	Pr	Cp $(\frac{J}{Kg\,k})$	ρ $(\frac{kg}{m^3})$	K$(\frac{W}{m\,k})$
آب خالص	۰/۰	٤۱۷۹	۹۹۷/۱	۰/٦۱۳
Al_2O_3	-	۳۹۷۰	۷٦٥	٤۰

معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و ناویر- استوکس در مختصات دکارتی به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

معادله مومنتوم در جهت x:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\vartheta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad (۲)$$

معادله مومنتوم در جهت y:

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial v}+\vartheta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \qquad (۳)$$

معادله انرژی:

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \qquad (٤)$$

اگر پارامترهای فوق به‌صورت زیر بی‌بعد شوند:

$$\theta^*=\frac{T-T_C}{\Delta T}\ ,\quad B=\frac{\beta}{H}\ ,\quad \Delta T=\frac{q''h}{k_{nf}}$$

$$Re=\frac{u_{in}\,h}{\vartheta}\ ,\quad X=\frac{x}{h}\ ,\quad Y=\frac{y}{h}=1$$

$$U=\frac{u}{u_{in}}\ ,\quad Pr=\frac{\vartheta}{\alpha}\ ,\quad V=\frac{v}{u_{in}}$$

معادلات پیوستگی، مومنتوم در جهت X، مومنتوم در جهت Y و معادله انرژی بدون بعد به ترتیب به‌صورت زیر در می‌آیند:

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (۵)$$

$$U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\frac{1}{\vartheta_f}\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) \qquad (٦)$$

$$U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\frac{1}{\vartheta_f}\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) \qquad (۷)$$

$$U\frac{\partial \theta}{\partial x}+V\frac{\partial \theta}{\partial Y}=+\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f}\frac{1}{Pr}\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) \qquad (۸)$$

عدد ناسلت متوسط در طول کانال به‌صورت زیر نشان داده می‌شود [20]:

$$Nu_x \quad {}_{y=0;h}=\frac{q''h}{(T_{(x)}-T)k_{nf}} \qquad (۹)$$

یا

$$Nu_{x\,(X)} \quad {}_{y=0;1}=\frac{1}{\theta^*(X)} \qquad (۱۰)$$

شرایط مرزی

سرعت لغزش از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$u_S=\beta\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0.h} \qquad (۱۱)$$

و به‌صورت بدون بعد چنین است:

$$U_S=\beta\ \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_{Y=0.1} \qquad (۱۲)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال برای نانوسیال آب- آلومینا از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$\rho_{nf}=(1-\emptyset)\,\rho_f+\emptyset\,\rho_s \qquad (۱۳)$$

$$\rho_{nf}\,.\,C_{p.nf}=(1-\emptyset)\,.\,\rho_f\,.\,C_{p.f}+\emptyset\,.\,\rho_s\,.\,C_{P.S} \qquad (۱٤)$$

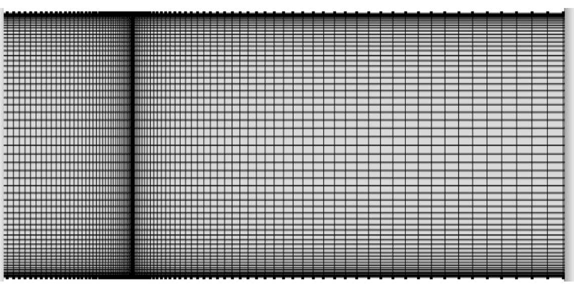
$$k_{n.f}=\frac{[k_s+2.K_f-2.\emptyset.(K_f-k_s)]}{k_s+2.K_f+\emptyset.(K_f-k_s)} \qquad (۱۵)$$

لزجت دینامیکی نانوسیال با استفاده از رابطه برینکمن تعریف می‌شود [21]:

$$\mu_{nf}=\mu_f/(1-\emptyset)^{2.5}$$

مطالعه شبکه حل و اعتبارسنجی

المان‌های در نظر گرفته شده برای شبکه حل به‌صورت المان-های با سازمان مربعی است و چون در نزدیکی دیوارها، گرادیان‌های دما و سرعت بیشتر است، اندازه شبکه در قسمت ریزتر است (مش لایه مرزی). از طرفی، چون گرادیان دما وقتی سیال از مرز عایق به مرز شار ثابت می‌رسد زیاد است، شبکه در این ناحیه نیز باید ریزتر باشد.



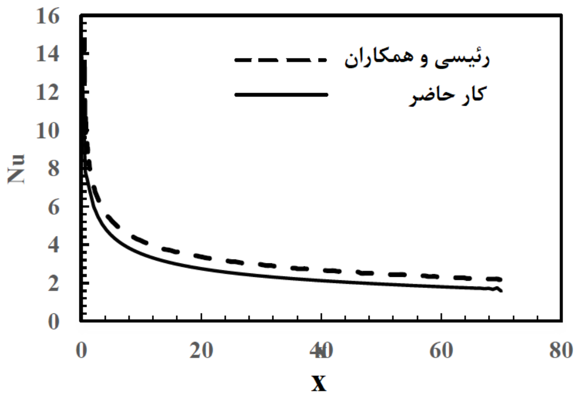
شکل ۲ شبکه حل مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌های حاضر

جدول (۲) مقدار دمای بی‌بعد میانگین را برای خروجی

میکروکانال برای شبکه‌های مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰ و ضریب لغزش ۰/۰۴ برای آب خالص نشان می‌دهد. مطابق نتایج تغییرات دمای بدون بعد خروجی به دست آمده از شبکه‌ای با تعداد گره ۴۵۰×۶۰ نسبت به شبکه‌ای با تعداد گره ۸۰۰×۱۰۰ بسیار ناچیز است، بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان شبکه حل بهینه انتخاب کرد. شکل (۳) مقادیر عدد ناسلت موضعی به دست آمده از کار حاضر و مقادیر گزارش شده توسط رییسی و همکاران [7] را مقایسه می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که اختلاف ناچیزی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر و نتایج رییسی و همکاران [7] وجود دارد. حداکثر خطا بین دو کار معادل ۷/۶ درصد است؛ بنابراین، اعتبار نتایج حاضر قابل قبول است.

جدول ۲ مقدار دمای بی‌بعد میانگین در خروجی میکروکانال برای شبکه‌های مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰ و ضریب لغزش ۰/۰۴ برای آب خالص

تعداد گره	$\theta^*_{ave.out}$	درصد خطای نسبی
۲۰×۱۵۰	۰/۲۳۷	۰/۰۰۱۱
۴۰×۳۰۰	۰/۲۳۷۲۵	۰/۰۰۰۰۸
۶۰×۴۵۰	۰/۲۳۷۲۸	۰/۰۰۰۰۴
۸۰×۶۰۰	۰/۲۳۷۲۷	صفر
۱۰۰×۸۰۰	۰/۲۳۷۲۷	صفر

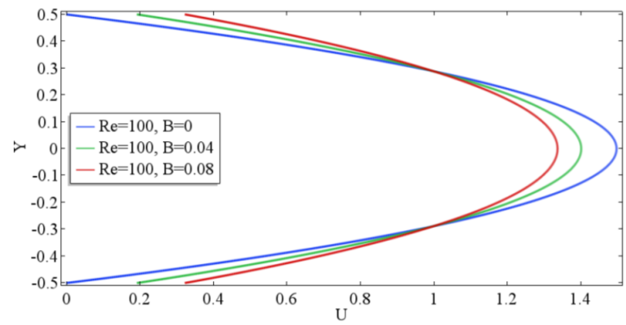


شکل ۳ اعتبارسنجی کار حاضر با نتایج رییسی و همکاران [7]

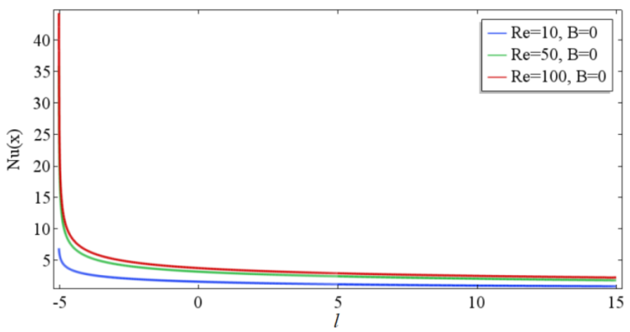
نتایج

تأثیر ضریب لغزش بر پروفیل سرعت

شکل (۴) پروفیل سرعت را در عدد رینولدز ۱۰۰ برای مقادیر مختلف ضرایب لغزش نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش ضریب لغزش سرعت ماکسیمم در وسط کانال کاهش می‌یابد و سرعت در کناره دیواره‌ها دیگر صفر نیست. به عبارت دیگر در حالی که سرعت در کنار دیواره‌ها افزایش می‌یابد مقدار آن در مرکز کانال کم می‌شود. علاوه بر این مقدار سرعت در ضریب لغزش بین صفر و ۰/۰۴ از مقدار سرعت در ضریب لغزش بین ۰/۰۴ و ۰/۰۸ بیشتر است. شکل (۵) مقدار ناسلت را برای مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان می‌دهد مطابق این شکل با افزایش عدد رینولدز مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین، چون در کناره دیواره عایق عدد ناسلت صفر است، مقدار عدد ناسلت ماکزیمم از ابتدای مرز شار ثابت شروع می‌شود و هرچه در امتداد کانال حرکت می‌کند با شیب کاهشی مواجه می‌شود و در انتهای کانال مقدار آن ثابت می‌شود.



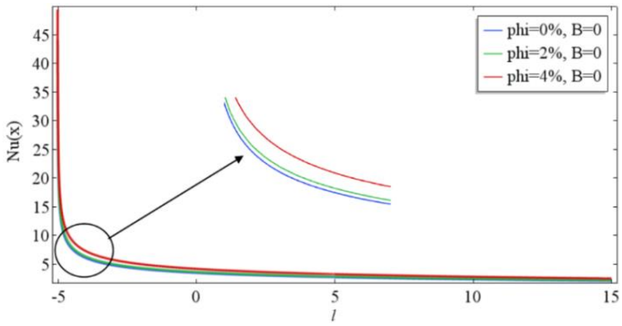
شکل ۴ پروفیل سرعت در ضرایب لغزش متفاوت



شکل ۵ عدد ناسلت موضعی در طول کانال

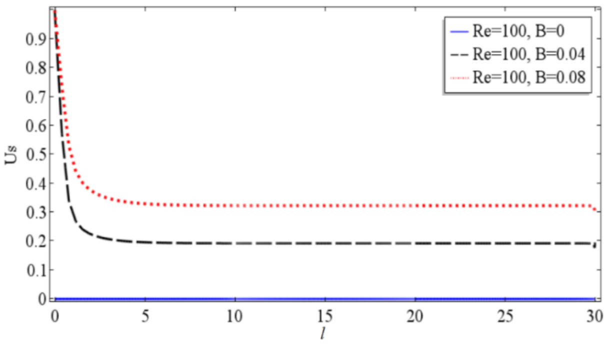
شکل (۶) مقدار عدد ناسلت را برای مقادیر مختلف درصد حجمی در عدد رینولدز ثابت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش درصد کسر حجمی نانوسیال مقدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد و علاوه بر این، مانند حالت قبل، چون در کناره

دیواره عایق مقدار عدد ناسلت صفر است، عدد ناسلت از ابتدای مرز شار ثابت رسم شده و هرچه در امتداد کانال حرکت می‌کند با شیب کاهشی مواجه می‌شود و در انتهای کانال مقدار آن ثابت می‌شود.



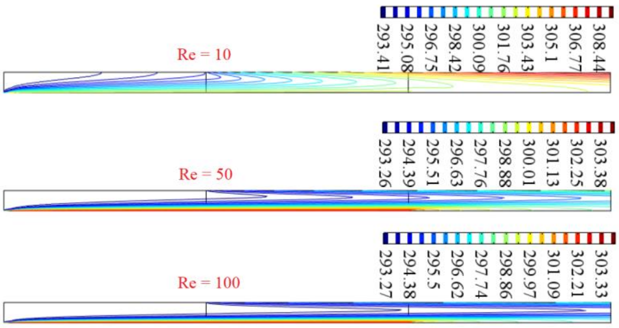
شکل ۶ عدد ناسلت موضعی در درصد حجمی متفاوت نانوسیال

شکل (۷) تغییرات سرعت لغزش را برای ضرایب لغزش صفر، ۰/۰۴ و ۰/۰۸ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سرعت لغزش در ابتدای ورودی کانال بیشترین مقدار را دارد و در مقدار آن در امتداد کانال کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار سرعت لغزش به بیشترین مقدار لغزش مربوط است.

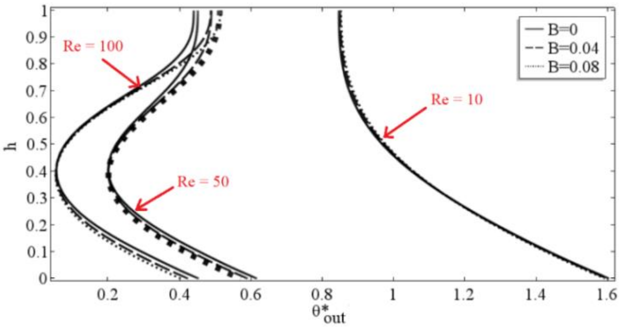


شکل ۷ سرعت لغزش کنار دیواره

شکل (۸) خطوط هم‌دما را برای اعداد رینولدز ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ نشان می‌دهد. هرچه عدد رینولدز افزایش می‌یابد، چگالی خطوط هم‌دما کمتر می‌شود و انتقال حرارت کنار دیواره بالایی بیشتر می‌شود. علاوه بر این، انتقال حرارت در خروجی نیز بیشتر می‌شود. هرچه عدد رینولدز بیشتر می‌شود، محلی که قرار است توسعه‌یافتگی حرارتی صورت گیرد، به سمت مرکز کانال و به طرف خروجی کانال حرکت می‌کند (جهت پیکان افزایش عدد رینولدز را نشان می‌دهد).



شکل ۸ خطوط هم‌دما برای آب



شکل ۹ دمای بی‌بعد میانگین در خروجی

شکل (۹) ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی بر حسب دمای بی‌بعد در خروجی برای مقادیر مختلف ضریب لغزش را نشان می‌دهد. دسته منحنی‌ها برای اعداد رینولدز ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ رسم شده‌اند. در عدد رینولدز ۱۰ دمای سیال به علت سرعت کم آن سریعاً افزایش می‌یابد و ضریب لغزش تأثیر زیادی بر پروفیل سرعت ندارد. در حالی‌که در مقادیر بالای عدد رینولدز، پروفیل دما با تغییر ضریب لغزش به طور قابل توجهی تغییر می‌یابد. می‌توان گفت که با افزایش تنش برشی در سطح تماس سیال، گرمای مبادله شده بیشتر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در کار حاضر، جریان نانوسیال در یک میکروکانال که به یک طرف آن شار ثابت اعمال می‌شود و طرف دیگر آن دما ثابت است مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با اعمال شرط لغزش، سرعت کنار دیواره صفر نیست و با افزایش ضریب لغزش سرعت ماکزیمم در وسط کانال کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار سرعت در ضریب لغزش بین صفر و ۰/۰۴ از مقدار سرعت در ضریب لغزش بین

۰/۰٤ و ۰/۰۸ بیشتر است. همچنین، هرچه عدد رینولـدز بیشـتر می‌شود محلی که قرار است توسعه‌یافتگی حرارتی صورت گیرد به سمت مرکز کانال و به طرف خروجی کانال حرکت مـی‌کنـد. در عدد رینولدز ۱۰ دمای سیال به علت سـرعت کـم آن سـریعاً افزایش می‌یابد و ضریب لغزش تأثیر زیادی بر پروفیـل سـرعت ندارد. در حالی‌که در مقادیر بالای عـدد رینولـدز، پروفیـل دمـا برای ضرایب سرعت لغزشی تأثیری بیشـتری دارد. طبـق نتـایج به‌دست آمده با افزایش درصـد کسـر حجمـی نانوسـیال مقـدار انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

فهرست علائم

B	ضریب لغزش
H (m)	ارتفاع کانال
Nu	عدد ناسلت
P (Pa)	فشار
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
T (K)	دما
(m/s)u	مؤلفه سرعت در جهت x
(m/s)u_s	سرعت لغزش
(m/s)v	مؤلفه سرعت در جهت y
x, y (m)	راستای محورهای مختصات

علائم یونانی

(kg/m^3)ρ	چگالی
(m^2/s)ϑ	ویسکوزیته سینماتیکی
(1/K)α	ضریب پخش گرما
(Pa. s)μ	ویسکوزیته دینامیکی
(kg/m^3)ρ	چگالی

واژه نامه

Slip Coefficient	ضریب لغزش
Forced Convection	انتقال حرارت اجباری
Thermal development	توسعه یافتگی حرارتی
Volume fraction	کسرحجمی
Nanofluid	نانوسیال

مراجع

[1] D. B. Tuckerman. and R. F. W. Pease, "High-performance heat sinking for VLSI", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 2, Pp. 126-129, (1981).

[2] A. Karimipour, A. Taghipour, and A. Malvandi, "Developing the laminar MHD forced convection flow of water/FMWNT carbon nanotubes in a microchannel imposed the uniform heat flux", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 419, Pp. 420-428, (2016).

[3] E. Jalali, and A. Karimipour, "Simulation the effects of cross-flow injection on the slip velocity and temperature domain of a nanofluid flow inside a microchannel", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*,vol. 29(5), Pp.1546-1562, (2019).

[4] R. Mohebbi, M. Rashidi, M. Izadi, N. A. C. Sidik, and H. W. Xian, "Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, Pp. 1291-1303, (2018).

[5] Z. Nikkhah, A. Karimipour, M. R. Safaei, P. Forghani-Tehrani, M. Goodarzi, M. Dahari, M., and W. Somchai., "Forced convective heat transfer of water/functionalized multi-walled carbon nanotube nanofluids in a microchannel with oscillating heat flux and slip boundary condition", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 68, Pp. 69-77, (2015).

[6] R. Kamali, and A. Binesh, "Numerical investigation of heat transfer enhancement using carbon nanotube-based non-Newtonian nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 37, Pp. 1153-1157, (2010).

[7] A. Raisi, B. Ghasemi,, and S. Aminossadati, "A numerical study on the forced convection of laminar nanofluid in a microchannel with both slip and no-slip conditions", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications,* vol. 59, Pp. 114-129, (2011).

[8] M. Nazari, M. Ashouri, and M. H. Kayhani, "Experimental investigation of forced convection of nanofluids in a horizontal tube filled with porous medium", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, Pp. 109-116, (2014), (In Persian).

[9] D. Toghraie, M. M. D. Abdollah, F. Pourfattah, O. A. Akbari, and B. Ruhani, "Numerical investigation of flow and heat transfer characteristics in smooth, sinusoidal and zigzag-shaped microchannel with and without nanofluid", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* vol. 131, Pp. 1757-1766, (2018).

[10] A. Karimipour, H. Alipour, O. A. Akbari, D. T. Semiromi, and M. H. Esfe, "Studying the effect of indentation on flow parameters and slow heat transfer of water-silver nano-fluid with varying volume fraction in a rectangular two-dimensional micro channel", *Indian Journal of Science and Technology,* vol. 8 (15), Pp. 51707, (2015).

[11] A. Arabpour, A. Karimipour, and D. Toghraie, "The study of heat transfer and laminar flow of kerosene/multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) nanofluid in the microchannel heat sink with slip boundary condition", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* vol. 131, Pp.1553-1566, (2018).

[12] L. Kuddusi, and E. Cetegen, "Prediction of temperature distribution and Nusselt number in rectangular microchannels at wall slip condition for all versions of constant heat flux", *International Journal of Heat and Fluid Flow,* vol. 28 , Pp. 777-786, (2007).

[13] A. Alfaryjat, A. Dobrovicescu, and D. Stanciu, "Influence of heat flux and Reynolds number on the entropy generation for different types of nanofluids in a hexagon microchannel heat sink", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27 (3) , Pp. 501-513, (2019).

[14] A. Esmaeilnejad, H. Aminfar, and M. S. Neistanak, "Numerical investigation of forced convection heat transfer through microchannels with non-Newtonian nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences,* vol. 75, Pp. 76-86, (2014).

[15] M. Shirazi, A. R. Shateri, .M Bayareh, "Numerical investigation of mixed convection heat transfer of a nanofluid in a circular enclosure with a rotating inner cylinder", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* vol. 133, Pp. 1061-1073, (2018).

[16] M. Sepyani, A. R. Shateri, M. Bayareh, "Investigating the mixed convection heat transfer of a nanofluid in a square chamber with a rotating blade", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 135, Pp. 609-623, (2019).

[17]W. Ajeeb, M. S. A. Oliveira, N. Martins, N. and S. M. Sohel Murshed, "Forced convection heat transfer of non-Newtonian MWCNTs nanofluids in microchannels under laminar flow", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 127, Pp. 105495, (2021).

[18]H. Wang, H., and X. Chen, "Numerical simulation of heat transfer and flow of Al2O3-water nanofluid in microchannel heat sink with cantor fractal structure based on genetic algorithm", *Analytica Chimica Acta*, vol. 1221, Pp. 339927, (2022).

[19]E. Abu-Nada, Z. Masoud, and A.Hijazi, "Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer,* vol. 35, Pp. 657-665, (2008).

[20]S. Aminossadati, A. Raisi, and B. Ghasemi, "Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel", *International Journal of Non-Linear Mechanics,* vol. 46, Pp. 1373-1382, (2011).

[21]H. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *The Journal of Chemical Physics,* vol. 20, Pp. 571-571, (1952).